

AIAS – ASSOCIAZIONE ITALIANA PER L'ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI
44° CONVEGNO NAZIONALE, 2-5 SETTEMBRE 2015, – UNIVERSITÀ DI MESSINA

AIAS 2015 - 513

STUDIO DEL COMPORTAMENTO DI METALLI REFRATTARI AD ELEVATI STRAIN-RATE E TEMPERATURE

F. Carra, C. Fichera, M. Scapin

*Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale,
Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino, e-mail: martina.scapin@polito.it*

Sommario

L'introduzione di acceleratori di particelle ad elevata energia, come il Large Hardon Collider (LHC) realizzato al CERN, ha richiesto lo sviluppo di metodi avanzati per predire il comportamento di particolari dispositivi che possono essere soggetti all'impatto con il fascio di particelle, e che, quindi, sono progettati per operare in un ambiente estremamente radioattivo e fortemente sollecitato da un punto di vista termo-strutturale. I materiali coinvolti devono soddisfare una serie di requisiti, quali: elevata resistenza, buona duttilità alle alte velocità di deformazione ed elevata stabilità alle alte temperature, oltre ad una buona resistenza alla corrosione e agli ambienti radioattivi. Ne deriva che i metalli refrattari e le loro leghe risultano essere degli ottimi candidati e lo studio del loro comportamento meccanico deve essere effettuato in un ampio intervallo di velocità di deformazione e di temperature.

Abstract

The introduction in recent years of new, extremely energetic particle accelerators, such as the Large Hadron Collider (LHC), built at CERN, required the development of advanced methods to predict the behaviour of components, which can be subjected to direct beam impact. Some components of the LHC machine are designed to operate in harsh radioactive environment highly solicited from thermo-structural point of view. For these reasons, the used materials have to satisfy a lot of requirements: high strength, good ductility at high strain-rates, high stability at high temperature as well as a good corrosion and radioactive resistance. In this sense, the refractory metals and alloys are suitable to this aim and the mechanical behaviour has to be investigated in a wide range of strain-rates and temperatures.

Parole chiave: metalli refrattari, Zerilli-Armstrong, elevate velocità di deformazione, elevate temperature, LHC, impatti ad elevate energia.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, l'introduzione di acceleratori di particelle ad elevata energia, come il Large Hardon Collider (LHC) realizzato al CERN, ha richiesto lo sviluppo di metodi avanzati per predire il comportamento di particolari dispositivi, come i Beam Intercepting Devices (BID), che possono essere soggetti all'impatto diretto del fascio di particelle. Per questo motivo alcuni componenti dell'LHC sono progettati per operare in ambiente estremamente radioattivo e fortemente sollecitato da un punto di vista termo-strutturale. Dato che tali componenti possono interagire direttamente con il fascio di particelle in caso d'incidente, la deposizione di energia nel materiale può divenire potenzialmente distruttiva. Al momento dell'impatto avviene una deposizione di energia istantanea nel materiale, la quale genera delle onde di shock che deformano il materiale ad elevati strain-rate ed elevate temperature [1-2]. Per riuscire a studiare e predire gli effetti dell'impatto, può risultare fondamentale

l'utilizzo di codici agli Elementi Finiti che permettono di simulare numericamente la risposta del materiale [3]. Inoltre, questo strumento può rappresentare un punto di riferimento nella progettazione di complesse prove sperimentali condotte direttamente nell'acceleratore [4]. Naturalmente, l'affidabilità delle simulazioni numeriche è fortemente legata alle relazioni costitutive che vengono utilizzate per descrivere il comportamento dei materiali.

Questo contesto ha dato l'impulso per lo sviluppo e l'esecuzione di test su metalli e leghe refrattarie a base di molibdeno, tungsteno, renio e iridio. Attualmente la letteratura scientifica è povera di dati relativi alla caratterizzazione di questi materiali, soprattutto in ampio intervallo di temperature e velocità di deformazione [5-7]. Inoltre, qualora si riescano a reperire dei dati sperimentali, difficilmente è stata eseguita la calibrazione di un modello di materiale, che è però fondamentale per le simulazioni numeriche.

In questo lavoro, vengono presentati i risultati delle campagne di prove sperimentali condotte sull'Inermet® IT180 e il molibdeno puro. Come anticipato, date le estreme condizioni di sollecitazione a cui tali materiali potrebbero essere soggetti, lo studio del comportamento meccanico è stato effettuato in un ampio range di strain-rate (10^{-3} ÷ 10^3 s⁻¹) e temperature (25÷1000 °C). Infine, i dati sperimentali sono stati analizzati ed è stata effettuata la calibrazione dei parametri del modello di Zerilli-Armstrong [8].

2. MATERIALI CONSIDERATI

I materiali considerati in questo lavoro sono la lega di tungsteno Inermet IT180 e il molibdeno puro. La lega Inermet® IT180, prodotta da Plansee, è attualmente utilizzata nel sistema di collimazione del Large Hardon Collider al CERN. Il materiale è nominalmente composto da: 95% wt. W, 3.5% wt. Ni e 1.5% wt. Cu in peso. Come è possibile osservare dalla microstruttura mostrata in Figura 1a, i grani di tungsteno (W) sono piuttosto grandi (dimensione media di circa 100 µm) e sono circondati da una seconda fase (matrice) che funge da legante. Questa seconda fase è una miscela di W-Ni-Cu che è caratterizzata da una bassa temperatura di fusione e rappresenta la connessione duttile tra i grani fragili di tungsteno, garantendo, oltretutto, la continuità termica ed elettrica al materiale. Il comportamento del materiale è, perciò, una diretta conseguenza dell'interazione tra le due fasi presenti nella struttura, che può variare in funzione della temperatura e della velocità di deformazione. Il materiale può mostrare diverse tipologie di cedimento [7]: separazione ai bordi di grano di tungsteno, clivaggio del grano di tungsteno, separazione all'interfaccia tra il grano di tungsteno e la fase legante o la frattura della matrice.

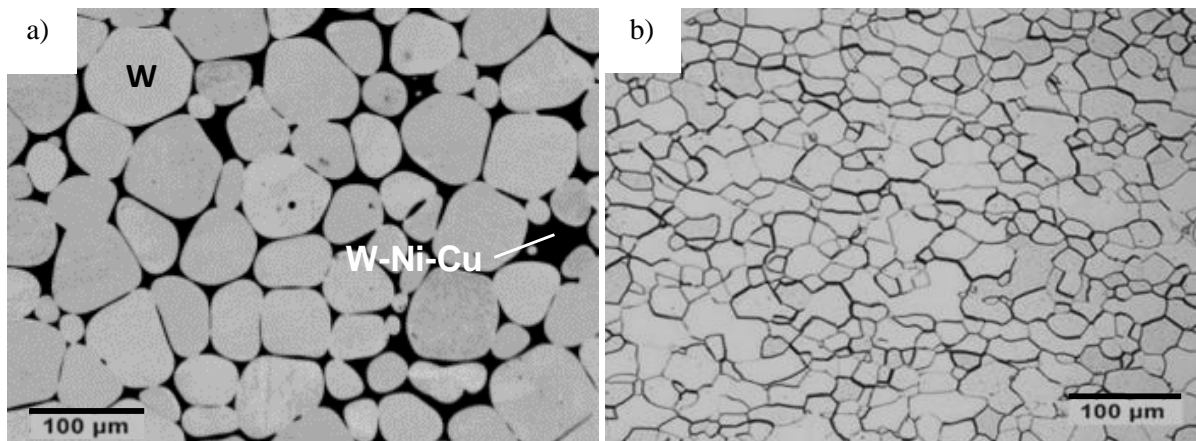


Figura 1: a) Microstruttura della lega di tungsteno IT180 e b) del molibdeno puro (Mo1).

In Figura 1b è riportata la microstruttura del molibdeno. Il materiale è ottenuto partendo da polvere di molibdeno di granulometria molto fine e di elevata purezza, la quale viene pressata, sinterizzata, lavorata a caldo e, infine, ricotta in modo da ottenere una struttura a grani molto regolare. Nello specifico, in questo lavoro sono stati analizzati due tipi di molibdeno che differiscono solo per il produttore: uno è fornito da Plansee (nel seguito verrà identificato con *Mo1*) e il secondo è prodotto da AT&M (nel seguito verrà identificato con *Mo2*).

3. PROVE SPERIMENTALI

La caratterizzazione dei materiali è stata realizzata sia a compressione che a trazione, ma in questo lavoro l'attenzione verrà rivolta solo ai risultati relativi alle prove di trazione. Per tali prove sono stati utilizzati provini con tratto utile di lunghezza di 5 mm e diametro di 3 mm [9].

Una serie di test è stata eseguita a temperatura ambiente e al variare della velocità di deformazione al fine di valutare la sensibilità allo strain-rate dei materiali. A tale scopo sono state effettuate prove a partire dai 10^{-3} s^{-1} fino a 10^1 s^{-1} . Le prove a medio-basse velocità di deformazione sono state eseguite utilizzando convenzionali macchine di prova elettromeccaniche e servo-idrauliche. Per tutti i materiali, non è stato possibile effettuare prove a velocità di deformazione superiori perché in tali condizioni il comportamento è estremamente fragile e, di conseguenza, non è possibile ottenere dati sufficientemente affidabili. Una seconda serie di prove è stata condotta a differenti temperature in condizioni di sollecitazione sia quasi-statiche che dinamiche, con lo scopo di ottenere informazioni relative al softening termico dei materiali. Il riscaldamento del provino è stato realizzato utilizzando un sistema ad induzione controllato in anello chiuso, basato sulle misurazioni ottenute da termocoppie direttamente saldate sulla superficie del provino. All'aumentare della temperatura il comportamento dei materiali torna ad essere sufficientemente duttile da consentire l'esecuzione dei test a 10^3 s^{-1} , condotte con la barra di Hopkinson in configurazione di trazione diretta.

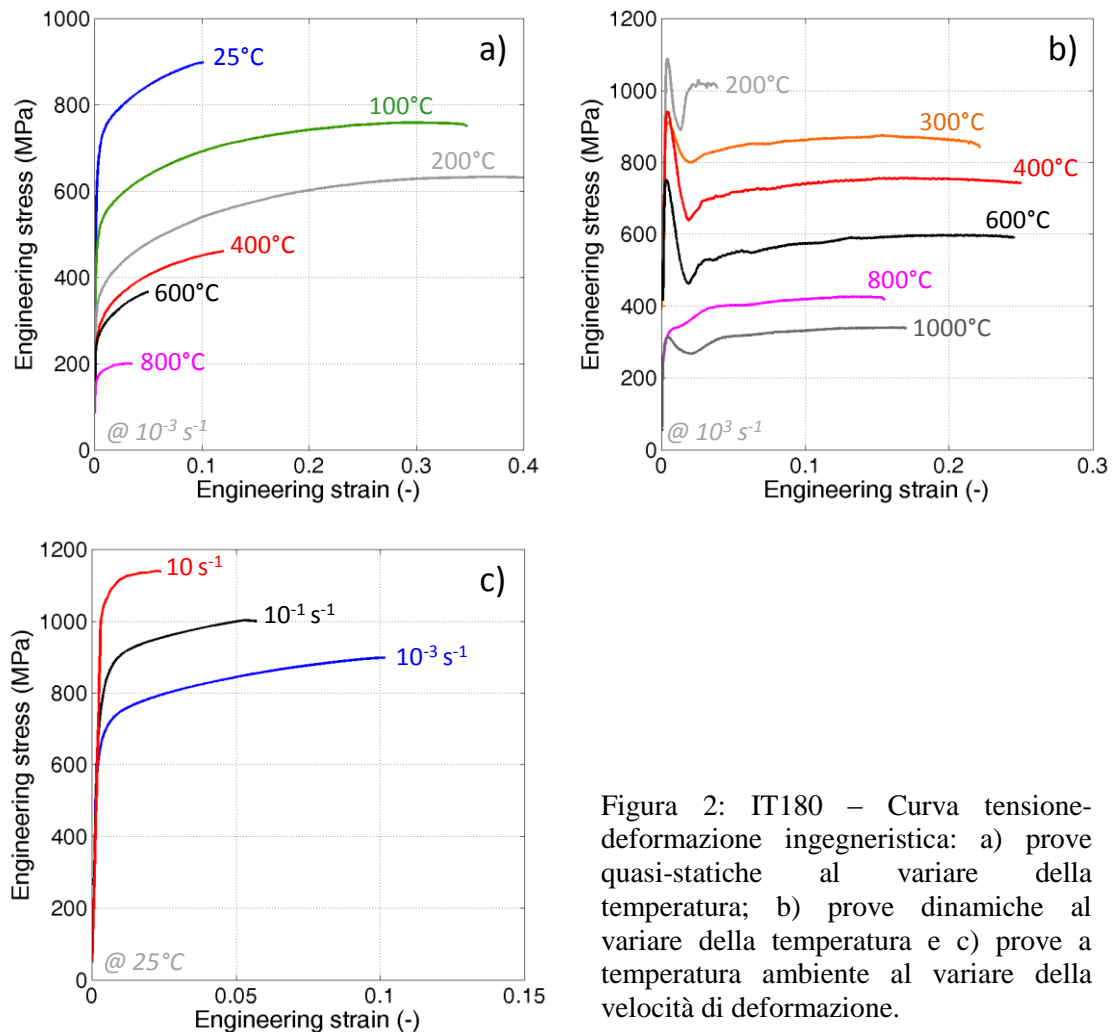


Figura 2: IT180 – Curva tensione-deformazione ingegneristica: a) prove quasi-statiche al variare della temperatura; b) prove dinamiche al variare della temperatura e c) prove a temperatura ambiente al variare della velocità di deformazione.

Tutte le prove sono state eseguite senza l'utilizzo di gas inerti: questo non rappresenta problemi per l'IT180, il quale non è soggetto ad ossidazione, mentre per il molibdeno sarebbe necessario lavorare in vuoto o in atmosfera inerte, per evitare l'ossidazione del materiale. L'intervallo di temperatura

investigato è da 25°C fino a 800°C nei test in condizioni quasi-statiche, mentre sono state raggiunte temperature fino a 1000°C nei test ad elevato strain-rate.

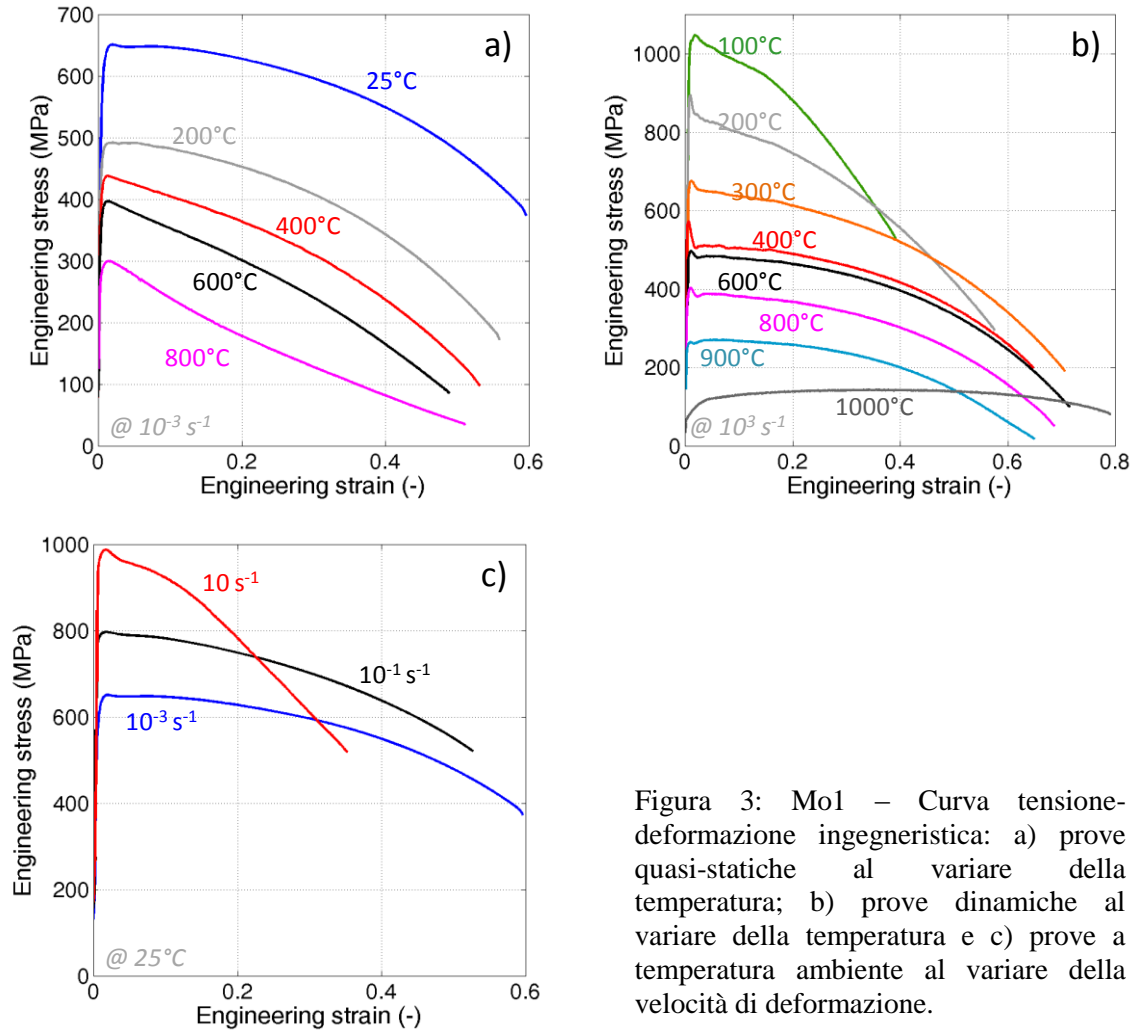


Figura 3: Mo1 – Curva tensione-deformazione ingegneristica: a) prove quasi-statiche al variare della temperatura; b) prove dinamiche al variare della temperatura e c) prove a temperatura ambiente al variare della velocità di deformazione.

Tabella 1: Dispersione dei dati per l'IT180, Mo1 e Mo2 in termini di deviazione standard (MPa).

Condizione di prova	IT180	Mo1	Mo2
$10^{-3} \text{ s}^{-1} @ 25^\circ \text{C}$	11	7	25
$10^{-3} \text{ s}^{-1} @ 100^\circ \text{C}$	2	-	-
$10^{-3} \text{ s}^{-1} @ 200^\circ \text{C}$	3	8	26
$10^{-3} \text{ s}^{-1} @ 400^\circ \text{C}$	12	10	33
$10^{-3} \text{ s}^{-1} @ 600^\circ \text{C}$	10	9	24
$10^{-3} \text{ s}^{-1} @ 800^\circ \text{C}$	11	27	8
$10^{-1} \text{ s}^{-1} @ 25^\circ \text{C}$	15	10	28
$10^1 \text{ s}^{-1} @ 25^\circ \text{C}$	7	22	6
$10^3 \text{ s}^{-1} @ 100^\circ \text{C}$	-	11	7
$10^3 \text{ s}^{-1} @ 200^\circ \text{C}$	18	11	30
$10^3 \text{ s}^{-1} @ 300^\circ \text{C}$	14	14	20
$10^3 \text{ s}^{-1} @ 400^\circ \text{C}$	19	4	31
$10^3 \text{ s}^{-1} @ 600^\circ \text{C}$	2	7	14
$10^3 \text{ s}^{-1} @ 800^\circ \text{C}$	10	16	20
$10^3 \text{ s}^{-1} @ 900^\circ \text{C}$	-	36	-
$10^3 \text{ s}^{-1} @ 1000^\circ \text{C}$	3	25	9

Tale differenza è principalmente dovuta al fatto che nelle prove a bassa velocità di deformazione la durata del test è molto lunga (circa 10 minuti) ed il mantenimento di elevate temperature rappresenta un limite di resistenza per l'intera attrezzatura di prova; invece dinamicamente non si presentano tali difficoltà poiché la durata del test è di circa 400 μs . Per una più approfondita descrizione dei setup sperimentali e delle metodologie di prove si rimanda a quanto riportato in [9].

Per ogni condizione di sollecitazione sono state eseguite almeno tre ripetizioni in modo da osservare la dispersione dei dati. Le curve che rappresentano il comportamento medio del materiale sono riportate nelle Figure 2-4.

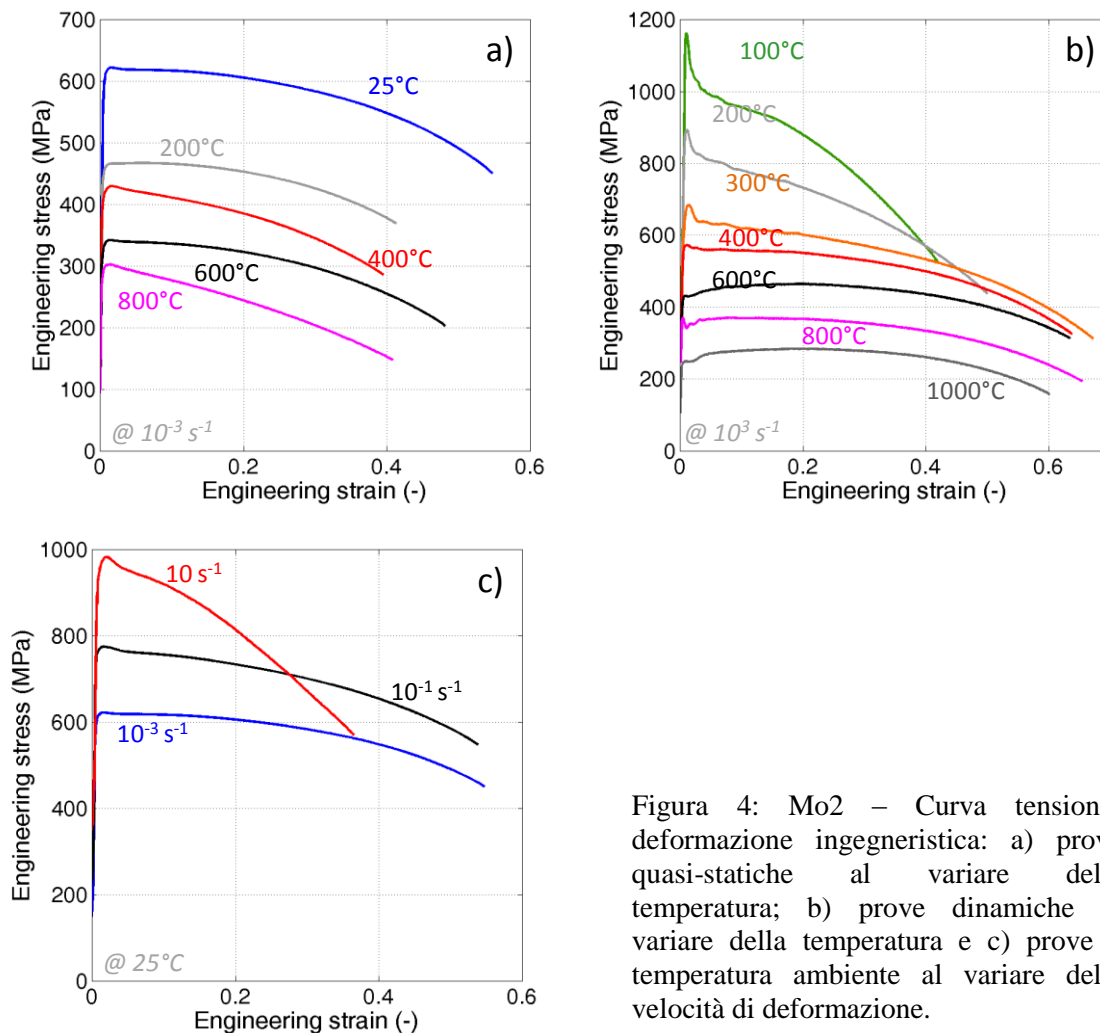


Figura 4: Mo2 – Curva tensione-deformazione ingegneristica: a) prove quasi-statiche al variare della temperatura; b) prove dinamiche al variare della temperatura e c) prove a temperatura ambiente al variare della velocità di deformazione.

La valutazione della dispersione dei dati è stata effettuata calcolando la deviazione standard media per ogni condizione di prova, (Tabella 1). In generale, la ripetibilità dei test è buona per tutti e tre i materiali, anche se il Mo2 risulta essere il materiale con la maggior dispersione.

Osservando le curve tensione-deformazione ingegneristiche è possibile concludere che sia la lega IT180 che il molibdeno puro sono sensibili alle variazioni di temperatura e di strain-rate. Inoltre, il comportamento mostrato è simile a quello caratteristico dei materiali con struttura Cubico Corpo Centrato (CCC): la tensione di snervamento diminuisce all'aumentare della temperatura e aumenta all'aumentare della velocità di deformazione. Questo comportamento giustifica la scelta del modello di Zerilli-Armstrong per riprodurre la risposta dei materiali.

Analizzando in modo più approfondito i risultati della lega IT180, è possibile notare che l'allungamento a rottura diminuisce drasticamente all'aumentare dello strain-rate, mentre a temperature elevate (sia in condizioni statiche che dinamiche), esso cresce all'aumentare della

temperatura, raggiunge un valore massimo per poi diminuire a temperature molto elevate. Inoltre, per tutte le condizioni di sollecitazione, è possibile notare l'assenza di strizione: il materiale non raggiunge la condizione di instabilità. Infine, si fa notare che una temperatura minima di 200°C è necessaria per eseguire le prove dinamiche, al di sotto di tale temperatura il materiale risulta estremamente fragile (Figura 5).

Per quanto riguarda i due tipi di molibdeno è possibile osservare che entrambi i materiali mostrano la presenza di un'instabilità in fase di snervamento. I due materiali hanno un comportamento simile, anche se il Mo2 mostra una maggiore stabilità ad elevate temperature. All'aumentare della temperatura, sia a basse che elevate velocità di deformazione, la resistenza dei materiali diminuisce, mostrando una sorta di effetto plateau a partire dai 400°C. All'aumentare dello strain-rate i materiali incrudiscono e l'allungamento a rottura si riduce. Al fine di eseguire le prove dinamiche è necessario raggiungere una temperatura minima di 100°C. Infine, partendo dalle medio-alte velocità di deformazione (10^1 s^{-1}), oltre un certo valore di deformazione, il lavoro plastico accumulato diviene rilevante e di conseguenza si ha un aumento di temperatura all'interno del provino. In questa condizione, il softening termico bilancia e supera l'effetto dell'incrudimento dovuto allo strain-rate: il processo inizia ad essere adiabatico.

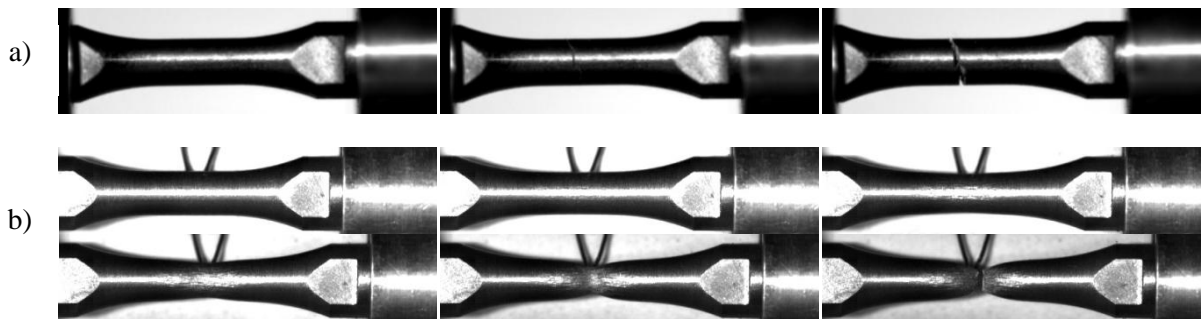


Figura 5: Sequenza di prova dinamica su molibdeno: a) temperatura ambiente, b) 200°C. Le immagini rappresentano solo alcuni frame di riprese ad alta velocità, risoluzione 512x120, framerate 100000 frame/s.

4. ANALISI DEI RISULTATI

I risultati sperimentali hanno mostrato che i materiali sono fortemente influenzati dalla deformazione, dallo strain-rate e dalla temperatura. Per queste ragioni è importante individuare un appropriato modello di materiale in grado di descrivere correttamente il comportamento dei materiali e un'affidabile strategia per la calibrazione dei parametri.

Come è ben noto, la letteratura scientifica è ricca di modelli costitutivi per la descrizione del comportamento visco-plastico dei materiali. Una delle più semplici relazioni in grado di considerare l'effetto accoppiato tra temperatura e strain-rate è quella proposta da Zerilli e Armstrong (Z-A) [8]. Essa esprime la tensione di flusso plastico in funzione della deformazione plastica, della velocità di deformazione e della temperatura assoluta e nel caso di materiali CCC assume la seguente espressione:

$$\sigma_y = C_1 + C_2 e^{(-C_3 + C_4 \ln \dot{\epsilon})T} + C_5 \epsilon^n \quad (1)$$

in cui C_i sono i parametri di modello. In accordo con la formulazione originale [8], alcuni di questi parametri sono riconducibili a grandezze fisiche del materiale; tuttavia in questo lavoro tutti i parametri sono considerati come variabili di ottimizzazione. In particolare, essi vengono ricavati attraverso un processo di ottimizzazione multi-obiettivo, nel quale i dati provenienti da diverse condizioni di sollecitazione vengono simultaneamente utilizzati come target. L'ottimizzazione è basata sulla minimizzazione della somma degli scarti quadratici medi tra curva sperimentale e curva ricostruita dal modello per ogni condizione di prova.

Siccome, come anticipato, la lega IT180, a differenza del molibdeno, non mostra strizione, per i due materiali sono stati seguiti due differenti approcci. Nel caso dell'IT180 è stato utilizzato un approccio

analitico, in cui le curve tensione-deformazione reali sono state calcolate partendo da quelle ingegneristiche (sotto l'ipotesi di conservazione del volume). L'intervallo di applicabilità, in termini di deformazione, di questo approccio è limitato dalla deformazione d'instabilità (il massimo della curva tensione-deformazione ingegneristica), che per il tungsteno è pressoché corrispondente a quella di rottura. Il processo di ottimizzazione numerica è stato realizzato in Matlab ed è stato basato sul confronto fra le curve tensione-deformazione vere ottenute sperimentalmente e quelle equivalenti ottenute sulla base del modello dell'Eq. 1. I risultati migliori in termini di correlazione tra la risposta sperimentale e quella numerica, sono stati ottenuti escludendo dal processo di ottimizzazione i risultati sperimentali corrispondenti a temperature superiori a 400°C in condizioni quasi-statiche. Nella fase di ottimizzazione per la determinazione dei sei parametri di modello (una descrizione più dettagliata del processo di ottimizzazione è presente in [9]) sono state prese in considerazione tutte le ripetizioni dei test. I parametri ottenuti sono riportati in Tabella 2.

Per quanto riguarda il molibdeno, sia per Mo1 che Mo2, è stato utilizzato un approccio numerico inverso basato su simulazioni FE. L'identificazione dei parametri del modello è raggiunta facendo variare i loro valori nel modello agli elementi finiti. Per ogni condizione di carico e vincolo è realizzato un modello FE. Il processo di ottimizzazione si basa sul confronto fra i risultati numerici e quelli sperimentali al fine d'ottenere la miglior correlazione. Il grande vantaggio di questa procedura è che non vengono fatte ipotesi riguardanti i campi tensione-deformazione, temperatura e strain-rate all'interno del materiale. Infatti, il confronto avviene in termini di grandezze macroscopiche che sono generalmente la forza e lo spostamento. L'ottimizzazione dei parametri è stata effettuata con un algoritmo dedicato incluso nel software LS-OPT.

Tabella 2: Parametri ottimizzati del modello Z-A per i tre materiali.

	C_1 (MPa)	C_2 (MPa)	C_3 (10 ⁻³ /K)	C_4 (10 ⁻⁴ /K)	C_5 (MPa)	n (-)
IT180	21	2572	3.416	1.591	915	0.497
Mo1	0	4030	6.449	3.073	524	0.110
Mo2	0	2833	5.203	2.639	485	0.135

Tabella 3: Scarto quadratico medio normalizzato per IT180, Mo1 e Mo2 ottenuto confrontando le curve sperimentali con quelle ricostruite utilizzando i parametri di Tabella 2 ("nc" sta a significare che i dati corrispondenti a quelle condizioni di carico non sono stati considerate nel processo di ottimizzazione).

Condizione di prova	IT180	Mo1	Mo2
10 ⁻³ s ⁻¹ @ 25 °C	0.0342	0.0492	0.0582
10 ⁻³ s ⁻¹ @ 100 °C	0.0339	-	-
10 ⁻³ s ⁻¹ @ 200 °C	0.0424	nc	nc
10 ⁻³ s ⁻¹ @ 400 °C	2.357	nc	nc
10 ⁻³ s ⁻¹ @ 600 °C	nc	nc	nc
10 ⁻³ s ⁻¹ @ 800 °C	nc	nc	nc
10 ⁻¹ s ⁻¹ @ 25 °C	0.0031	0.0404	0.129
10 ¹ s ⁻¹ @ 25 °C	0.0729	0.463	1.400
10 ³ s ⁻¹ @ 100 °C	-	0.256	0.358
10 ³ s ⁻¹ @ 200 °C	0.147	0.140	0.0868
10 ³ s ⁻¹ @ 300 °C	0.0266	0.0728	0.321
10 ³ s ⁻¹ @ 400 °C	0.0412	0.527	0.0540
10 ³ s ⁻¹ @ 600 °C	0.0267	0.772	0.276
10 ³ s ⁻¹ @ 800 °C	0.733	0.400	0.268
10 ³ s ⁻¹ @ 900 °C	-	nc	-
10 ³ s ⁻¹ @ 1000 °C	2.94	nc	nc

Per il molibdeno, i risultati migliori, in termini di confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali, sono stati ottenuti escludendo i risultati sperimentali in condizioni quasi-statiche al

variare della temperatura e quelli in condizioni dinamiche al di sopra di 800°C. Ogni processo di ottimizzazione è caratterizzato da 9 obiettivi e 5 variabili da determinare (C_I è stato posto uguale a 0). Le curve sperimentali poste come target di ottimizzazione sono state ottenute facendo la media di tutte le curve corrispondenti ad ogni condizione di sollecitazione. I parametri ottenuti sono riportati in Tabella 2.

Per i tre materiali, i confronti qualitativi tra le grandezze ottenute sperimentalmente e quelle ricostruite utilizzando i parametri di Tabella 2 in condizioni dinamiche, sono riportati in Figura 6. Come è possibile notare, le curve ottenute utilizzando il modello di Z-A ottimizzato sono capaci di riprodurre la risposta del materiale con un buon livello di accuratezza. Per poter meglio quantificare la differenza tra le curve, in Tabella 3 sono riportati, per ogni condizione di sollecitazione, gli scarti quadratici medi normalizzati (NMSE), calcolati in base alla seguente relazione:

$$NMSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{x_k - \hat{x}_k}{\max(x)} \right)^2 \times 100 \quad (2)$$

dove l'indice k identifica uno degli n punti delle curve, x rappresenta la curva sperimentale e \hat{x} quella ricostruita mediante il modello di Z-A.

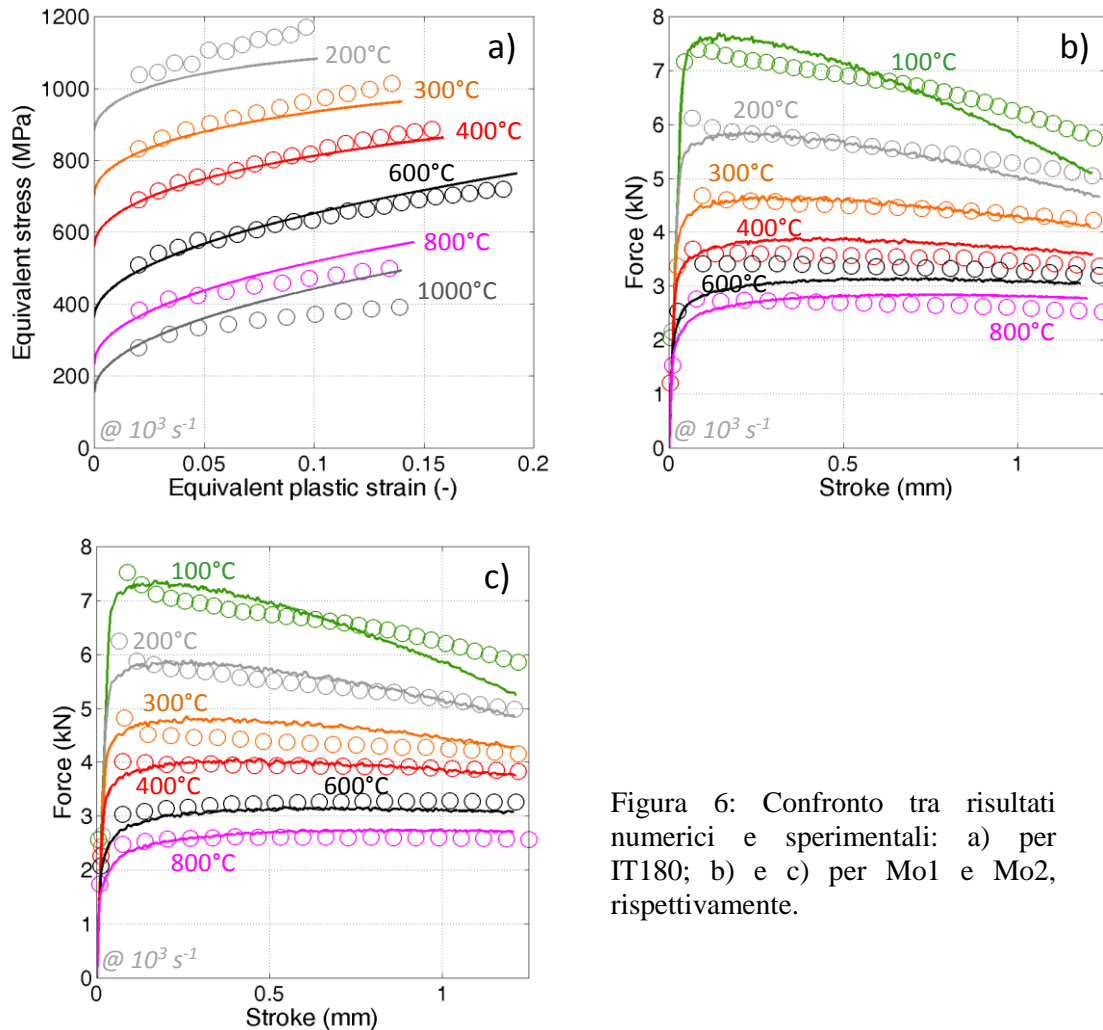


Figura 6: Confronto tra risultati numerici e sperimentali: a) per IT180; b) e c) per Mo1 e Mo2, rispettivamente.

In Figura 7, i modelli di Z-A ottenuti per i tre materiali sono messi a confronto. In Figura 7.a i modelli sono confrontati in termini di tensione di flusso plastico in condizioni quasi-statiche a temperatura ambiente. Invece, in Figura 7.b il confronto è fatto in termini di tensione equivalente in funzione della

temperatura al 5% di deformazione. Come atteso, i modelli corrispondenti alle due tipologie di molibdeno mostrano un'evoluzione molto simile. Per questi materiali, il comportamento a bassi valori di strain-rate al variare della temperatura è ottenuto per estrapolazione.

Il confronto tra il modello del molibdeno e quello dell'Inermet IT180, mostra che, rispetto al molibdeno, la lega di tungsteno risulta aver maggior resistenza a basse temperature, mentre avviene l'esatto opposto all'aumentare della temperatura dovuto alla presenza della seconda fase, che ha una bassa temperatura di fusione.

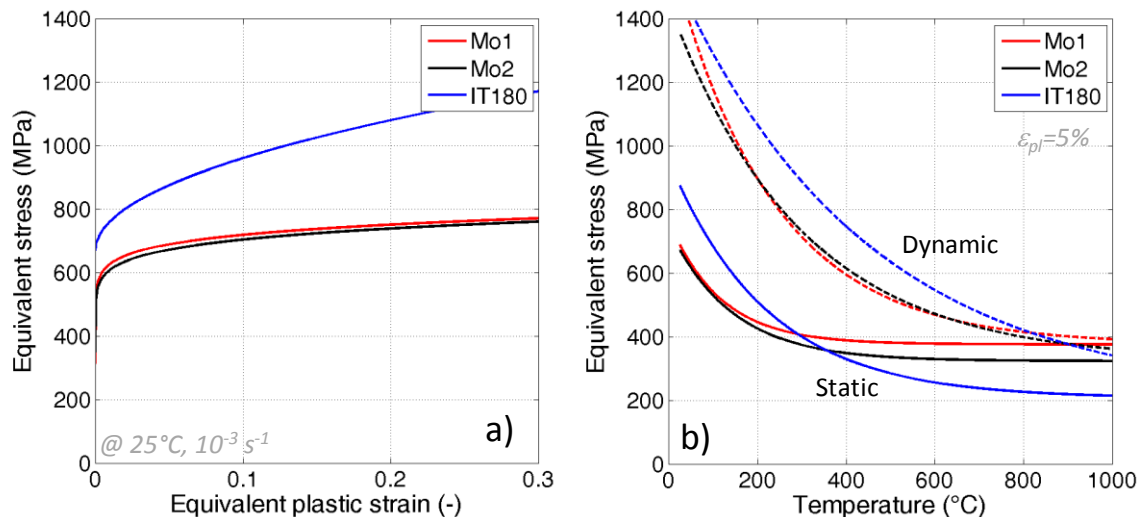


Figura 7: Confronto tra i modelli di Z-A ottimizzati per i tre materiali: a) in termini di tensione di flusso plastico in condizioni quasi-statiche a temperatura ambiente; b) in termini di tensione equivalente in funzione della temperatura in condizioni quasi-statiche e dinamiche.

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata eseguita una campagna di prove sperimentali al fine di analizzare la sensibilità alla temperatura e alla velocità di deformazione della lega di tungsteno IT180 e del molibdeno puro (realizzato da due diversi produttori). Sono state eseguite prove di trazione partendo da condizioni di sollecitazione quasi-statiche fino a raggiungere elevate velocità di deformazione (10^3s^{-1}). Le prove dinamiche sono state realizzate utilizzando un setup in configurazione di trazione diretta della barra di Hopkinson. La sensibilità alla temperatura è stata studiata partendo dalla temperatura ambiente fino a $800/1000^{\circ}\text{C}$ sia in condizioni quasi-statiche che dinamiche. Il riscaldamento del provino è stato realizzato utilizzando un sistema ad induzione controllato in anello chiuso, basato sulle misurazioni ottenute da termocoppie direttamente saldate sulla superficie del provino. I risultati sperimentali mostrano che la risposta meccanica dei materiali è influenzata sia dalla temperatura che dalla velocità di deformazione. La lega IT180 rispetto al molibdeno è caratterizzata dall'assenza della strizione. Per tutti i materiali si è osservata una riduzione dell'allungamento a rottura al crescere dello strain-rate e l'impossibilità di eseguire prove dinamiche a temperatura ambiente. I risultati sperimentali sono stati utilizzati al fine di calibrare i parametri del modello di Zerilli-Armstrong nella formulazione dedicata ai materiali con struttura cristallina Cubico Corpo Centrato. L'identificazione dei parametri è stata basata sulla definizione di ottimizzazioni multi-obiettivo. Due diversi approcci sono stati utilizzati. Nel caso dell'IT180 l'ottimizzazione è stata basata sull'interpolazione delle curve tensione-deformazione reale, ottenute a partire dalle curve ingegneristiche sotto l'ipotesi di conservazione del volume. Invece, a causa dell'instabilità e della strizione, nel caso del molibdeno è stato necessario ricorrere ad un approccio numerico inverso basato su simulazioni agli elementi finiti. I modelli ottimizzati di Z-A si sono dimostrati capaci di riprodurre la risposta dei materiali con un buon grado di accuratezza. I modelli ottimizzati ottenuti per le due tipologie di molibdeno considerate hanno mostrato risultati

molto simili. Il modello ottenuto per l'IT180, mostra una maggior resistenza a basse temperature, associata a una maggiore riduzione all'aumentare della temperatura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Bertarelli et al., "Limits for beam induced damage: reckless or too cautious?", *Proceeding of Workshop on LHC performance*, (2011).
- [2] M. Scapin, L. Peroni, A. Dallochio, "Effects induced by LHC high energy beam in copper structures", *J. Nucl. Mater.*, Vol. 420 (1-3), 463-472 (2012).
- [3] M. Scapin, L. Peroni, V. Boccone, F. Cerutti, "Effects of High-Energy Intense Multi-Bunches Proton Beam on Materials", *Comput. Struct.*, Vol. 141, 74-83 (2014).
- [4] A. Bertarelli et al., "An experiment to test advanced materials impacted by intense proton pulses at CERN HiRadMat facility", *Nucl. Instrum. Meth. B*, Vol. 308, 88-99 (2013).
- [5] G.P. Skoro, J.R.J. Bennett, T.R. Edgecock, C.N. Booth, "Yield strength of molybdenum, tantalum and tungsten at high strain rates and very high temperatures", *J. Nucl. Mater.*, Vol. 426, 45-51 (2012).
- [6] S. Nemat-Nasser, W. Guo, M. Liu, "Experimentally-Based Micromechanical Modeling of Dynamic Response of Molybdenum", *Scripta Mater.*, Vol. 40 (7), 859-872 (1999).
- [7] W.S. Lee, G.L. Xiea, C.F. Lin, "The strain rate and temperature dependence of the dynamic impact response of tungsten composite", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 257, 256-267 (1998).
- [8] R.W. Armstrong, F.J. Zerilli, "Dislocation Mechanics Based Analysis of Material Dynamic Behavior", *J. Phys.*, Vol. C3 (9), 529-534 (1988).
- [9] M. Scapin, "Mechanical characterization and modeling of the heavy tungsten alloy IT180", *Int. J. Refract. Met. H.*, Vol. 50, 258-268 (2015).